

# ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ДВОШАРОВОЇ МОДЕЛІ ҐРУНТУ ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ ВЕРТИКАЛЬНОГО ЕЛЕКТРИЧНОГО ЗОНДУВАННЯ, ПРОВЕДЕНОГО В РАЙОНІ РОЗТАШУВАННЯ ПІДСТАНЦІЙ

О.О. Петков, *інженер*, Д.Г. Коліушко, *канд. техн. наук*, І.Ю. Лінк, *інженер*  
**Науково-дослідний і проектно-конструкторський інститут "Молнія"**  
**Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут"**

Діагностика стану заземлювальних пристроїв (ЗП) підстанцій [1], яка проводиться у ряді областей України [2] науково-дослідним і проектно-конструкторським інститутом "Молнія", містить у собі визначення таких електричних характеристик підстанцій як опір ЗП та напруга дотику. Ці показники визначаються розрахунковим і експериментальним шляхом. Вхідними даними для проведення розрахунків зазначених величин є параметри двошарової моделі ґрунту, що визначаються за результатами вертикального електричного зондування (ВЕЗ), яке проводиться в районі розташування підстанції в процесі діагностики стану ЗП.

Загальний принцип їхнього визначення за допомогою установки Веннера докладно описаний у літературі, наприклад [3], і, стосовно до нашої задачі, може бути представлений у такий спосіб: у ґрунт за допомогою двох точкових електродів (див. рис. 1 – електроди А і В), розташованих на деякій відстані один від одного, вводиться електричний струм  $I$ ; у межах електричного поля, цього струму, поміщають два приймальні (потенційні) електроди (див. рис. 1 – електроди М і N), між якими вимірюють різницю електричних потенціалів  $\Delta U$ . Величина відношення  $D = \Delta U / I$  у загальному випадку залежить від низки факторів. Інтерпретація зміни значень  $D$ , отриманих при різних відстанях між електродами  $L$ , дозволяє визначити параметри ґрунту в зоні проведення ВЕЗ. В даний час достатньо повно розроблені методи інтерпретації даних ВЕЗ для вирішення геофізичних задач, зокрема – електророзвідки [4, 5], крім того, мають відповідні комп'ютерні програми [6]. Однак метою інтерпретації даних у електророзвідці є визначення дійсної структури ґрунту по його електричних характеристиках. Досягнення цієї мети передбачає залучення експертів, тоді як в нашому випадку постає вимога оперативного, без участі експерта, визначення характеристик компонентів ґрунту при його структурі, заданою теоретичною моделлю. Описана вимога визначила необхідність у проведенні додаткових досліджень, що дозволяють автоматизувати процедуру визначення параметрів двошарової моделі ґрунту за даними ВЕЗ. Вибір двошарової моделі ґрунту обумовлений особливостями обчислювального процесу при розрахунку опору ЗП і напруги дотику [7].

Постановка задачі. Нехай мається набір даних вимірів які отримані при різних відстанях між електродами  $L_j$  у результаті проведення ВЕЗ:

$$D_{L1}, D_{L2}, \dots, D_{Ln}, \quad (1)$$

де  $D_{Lj} = \Delta U_j / I_j$ ;

$\Delta U_j$  – різниця потенціалів між приймальними електродами в схемі ВЕЗ, поданої на рис. 1;

$I_j$  – струм у схемі ВЕЗ;

$n$  – кількість вимірів.

Нехай також мається аналітичний вираз, що описує зміну величини  $D$  для двошарової моделі ґрунту:

$$D_p = f(\rho_1, \rho_2, h, L) \quad (2)$$

де  $D_p$  - розрахункове значення величини;

$\rho_1, \rho_2$  – питомий опір відповідно першого і другого шару ґрунту;

$L$  - відстань між електродами;

$h$  – глибина першого шару.

Потрібно вибрати величини  $\rho_1, \rho_2, h$  таким чином, щоб сукупність значень величини  $D_{L_i}$  визначена з досліду ВЕЗ "щонайкраще" збігалася з розрахунковою сукупністю значень при відповідних відстанях між електродами  $D_{p_i} = f(\rho_1, \rho_2, h, L_i)$ . Як критерій збігу нами прийнята величина відхилення відповідних розрахункових і експериментальних даних.

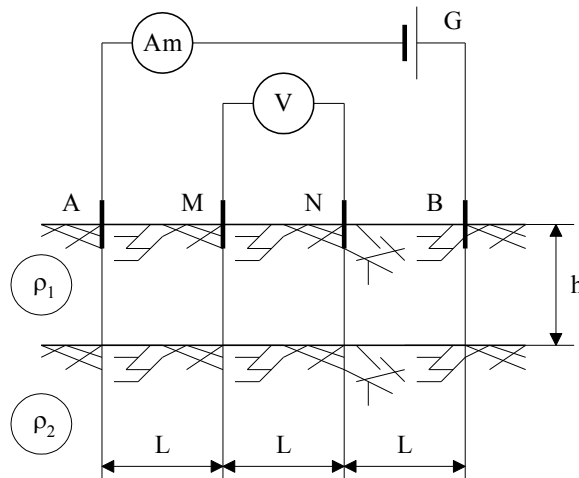


Рисунок 1. Схема виміру електричного опору ґрунту.

A, B – струмові (живильні) електроди; M, N – потенційні (приймальні) електроди;  
Am – амперметр, V – вольтметр, G – джерело живлення,  $h$  – глибина першого шару,  
 $\rho_1, \rho_2$  – питомі опори першого і другого шару ґрунту відповідно.

Можна показати, що для схеми, наведеної на рис. 1 (чотириполюсна установка Веннера), теоретична модель величини  $D$  має вигляд:

$$D = \frac{\Delta U}{I} = \frac{\rho_1}{\pi L} \left\{ \frac{1}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} K_{21}^n \left[ \frac{2}{\sqrt{1 + 4n^2 \left( \frac{h}{L} \right)^2}} - \frac{1}{\sqrt{1 + n^2 \left( \frac{h}{L} \right)^2}} \right] \right\} \quad (3)$$

де  $\Delta U$  – різниця потенціалів між електродами M і N;  
 $I$  – величина струму, що протікає в ґрунті від джерела G;  
 $K_{21} = (\rho_2 - \rho_1) / (\rho_2 + \rho_1)$ ;  
 $\rho_1, \rho_2$  – питомий опір відповідно першого і другого шару ґрунту;  
 $L$  – відстань між електродами;  
 $h$  – глибина першого шару;  
 $n$  – номер члена ряду.

Тоді поставлена задача математично може бути сформульована в такий спосіб:

Потрібно знайти мінімум цільової функції, що представляє собою максимальне відносне відхилення між виміряними і розрахованими значеннями величини D

$$Y = \text{MAX} |(D_{Li} - D_{pi}) / D_{Li}| \quad (4)$$

де  $D_{Li}$  – виміряне значення;  
 $D_{pi} = f(\rho_1, \rho_2, h, L_i)$  - значення, що обчислюється по (3);  
 $i = 1 \dots n$ ;  
 $n$  – кількість вимірів.

при таких обмеженнях

$$\begin{aligned} \rho_{1\min} < \rho_1 < \rho_{1\max} \\ \rho_{2\min} < \rho_2 < \rho_{2\max} \\ h_{\min} < h < h_{\max}. \end{aligned} \quad (5)$$

Чисельні значення обмежень глибини першого шару ґрунту у виразі (5) можуть бути визначені в такий спосіб. Мінімальне значення глибини першого шару –  $h_{\min}$  визначається виходячи з особливостей обчислювального процесу при розрахунку опору ЗП і напруги дотику, і його величина приймається не менш глибини залягання горизонтальних заземлювачів на підстанції, визначеної в процесі діагностики за методикою [8]. За даними діагностики вона складає 0,3...1,5 м. Для визначення  $h_{\max}$  проведено аналіз (3), який показав, що при необмеженому збільшенні  $h$  вираз (3) спрощується і приймає вид

$$D = \rho_1 / 2\pi L. \quad (6)$$

Таким чином, величина D перестає залежати від  $\rho_2$  і ґрунт може розглядатися як одношаровий, що дозволяє, у якості  $h_{\max}$ , прийняти значення  $h$  починаючи з якого виконується умова

$$\frac{1}{2} \gg \sum_{n=1}^{\infty} K_{21}^n \left[ \frac{2}{\sqrt{1 + 4n^2 \left(\frac{h}{L}\right)^2}} - \frac{1}{\sqrt{1 + n^2 \left(\frac{h}{L}\right)^2}} \right] \quad (7)$$

З (7) видно, що чим ближче  $|K_{21}|$  до значення рівного одиниці, тим при більших значеннях  $h$  воно виконується. Розрахунок показує, що для  $|K_{21}| \leq 0,999999$  права частина (7) не перевищує 10% від лівої частини при  $h/L \geq 1,96$ ; тобто можемо прийняти  $h_{\max} = 1,96 \cdot L$ .

Як обмеження для питомого опору ґрунтів можна прийняти наступні значення  $\rho_{\min} = 1 \text{ Ом} \cdot \text{м}$  і  $\rho_{\max} = 20000 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ , що обрані на підставі результатів експериментальних досліджень НДПКІ "Молнія", проведених на території України.

При проведенні геофізичних досліджень рішення задачі, яка описується (4) і (5) знаходиться методами локального пошуку мінімуму багатопараметричних функцій [3, 4], що має свої переваги при використанні діалогового режиму, що забезпечує використання інтелектуальних можливостей експертів-геофізиків для інтерпретації результатів, але мало ефективно при вимогах повної автоматизації проведених розрахунків.

На рис. 2 приведена зміна величини знайденого за допомогою методу Хука – Дживса мінімуму цільової функції в залежності від вхідної точки. З малюнка видно, що в залежності від координат вхідної точки ( $\rho_1$ ,  $\rho_2$ ,  $h$ ) мінімальне значення цільової функції змінюється від 22 до 85 %. (Тут і далі по тексту всі обчислення проводилися з використанням реальних даних ВЕЗ, проведеного на підстанції "Красноград" АК "Харківобленерго"). Дані рис. 2 дозволяють зробити висновок, що результат у значній мірі залежить від вхідної точки. Це значить, що цільова функція є багатоекстремальною і необхідно використовувати методи мінімізації, що забезпечують пошук глобального мінімуму у всій області, обумовленою (5).

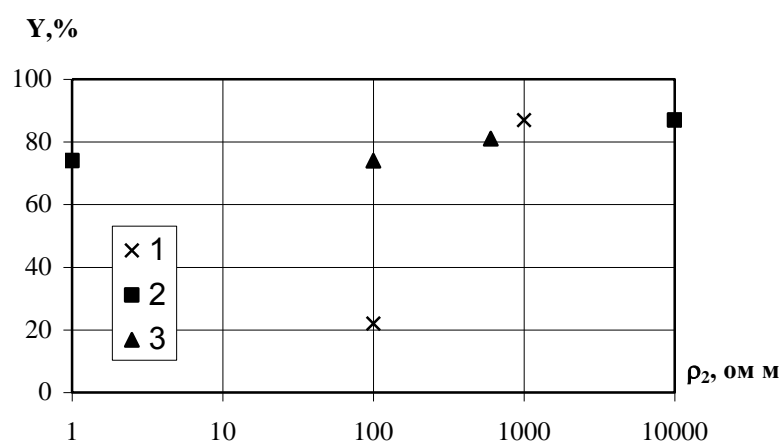


Рисунок 2. Зміна результату мінімізації в залежності від вхідної точки.

Значення у вхідній точці: 1 –  $\rho_1 = 1000 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ ,  $h = 10 \text{ м}$ ;  
 2 –  $\rho_1 = 10000 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ ,  $h = 1 \text{ м}$ , 3 –  $\rho_1 = 4000 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ ,  $h = 7 \text{ м}$

Для перебування глобального мінімуму був використаний комбінований метод, що включає в себе визначення випадкової вхідної точки методом випадкового пошуку і перебування локального мінімуму методом Хука – Дживса [9]. Ця процедура повторювалася деяку

кількість разів, і вибирався глобальний мінімум з обчислених локальних. При цьому величина глобального мінімуму підтверджувалася  $K_{\Pi}$  разів. Необхідна кількість підтверджень –  $K_{\Pi}$  визначалася за рішенням задачі про довірчий інтервал для малих імовірностей подій [10], що для нашого випадку може бути сформульована в такий спосіб.

Нехай мається процедура обчислення функції  $Y$  випадкових величин  $X$  і є підстави вважати, що її мінімальне значення дорівнює  $Y_{\min}$ . Необхідно визначити кількість обчислень функції  $Y$  при випадкових реалізаціях  $X - K_1$ , що дозволяло б з надійністю  $H_d$  стверджувати, що значення  $Y_{\min}$  є мінімальним з імовірністю  $1 - P_o$ . Використовуючи рішення, наведене в [10] маємо

$$K_{\Pi} = \ln(1 - H_d) / \ln(1 - P_o) \quad (10)$$

де  $K_{\Pi}$  – необхідна кількість підтверджень мінімального значення цільової функції;

$H_d$  – надійність визначення результату обчислень;

$P_o$  – верхня межа імовірності того, що знайдене в результаті обчислень значення не є мінімальним.

Блок-схема програми обчислення наведена на рис. 3. У блоці 2 уводиться необхідна кількість підтверджень результатів визначення глобального мінімуму цільової функції, обчислена по (10) –  $K_{\Pi}$ , дані ВЕЗ –  $D, L$  і значення границь пошуку –  $X$ . Блок 3 установлює початкові значення лічильника кількості підтверджень –  $n$  і глобального мінімуму цільової функції –  $Y_{\min gl}$ .

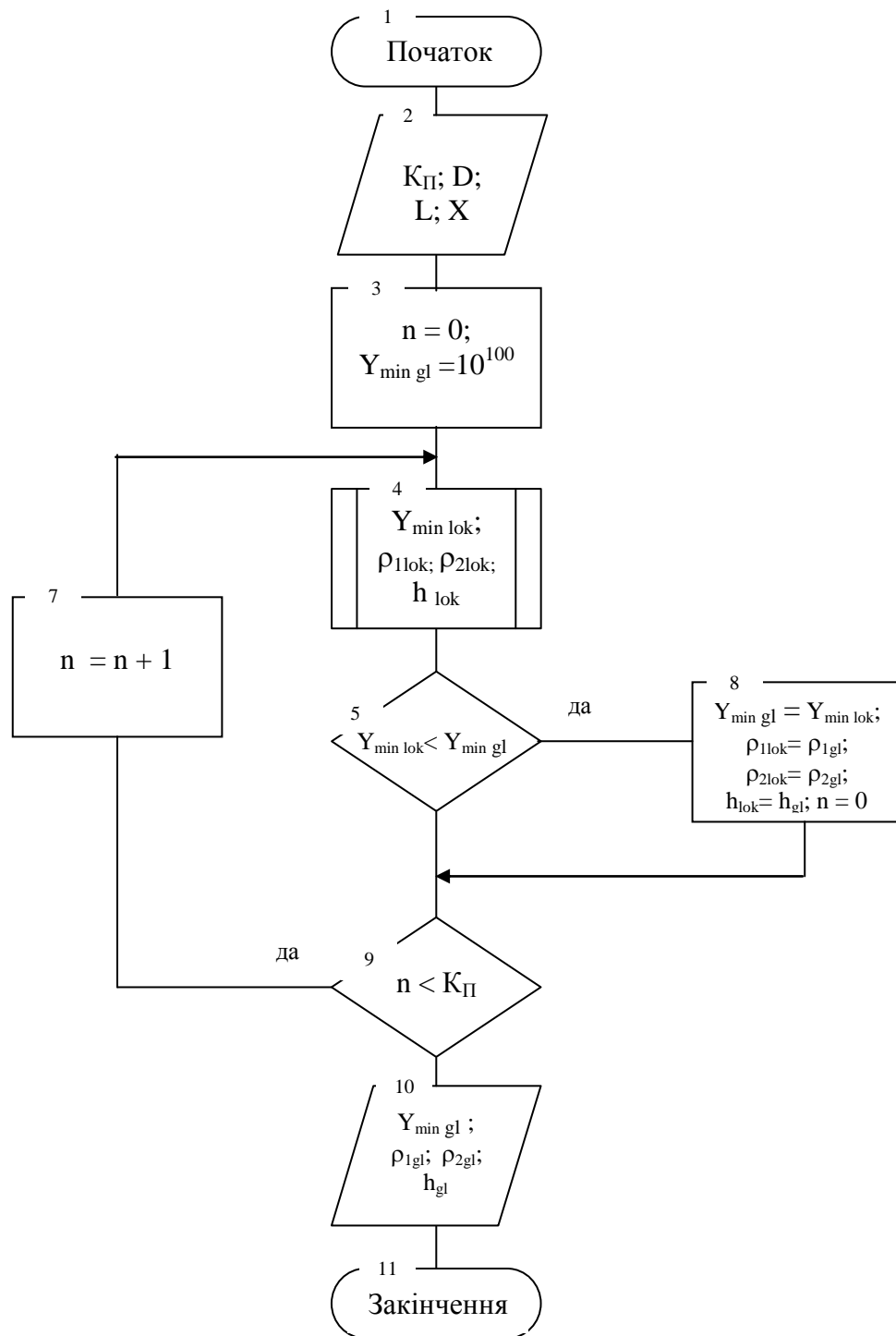


Рисунок 3. Блок-схема програми визначення параметрів двошарової моделі ґрунту за даними БЕЗ.

Блок 4 містить у собі процедуру генерування випадкової вихідної точки і стандартну процедуру знаходження мінімуму методом Хука-Дживса [9]. Блоки 5 і 8 здійснюють визначення мінімального значення цільової функції і відповідних йому значень параметрів моделі ґрунту. Блоки 7 і 9 забезпечують необхідну кількість підтверджень вірогідності отриманого значення  $Y_{\min gl}$ .

На рис. 4 наведені результати мінімізації в залежності від кількості обчислень цільової функції для класичного випадкового пошуку і запропонованого комбінованого. Як видно з графіків, запропонований метод є більш ефективним уже при кількості обчислень цільової функції порядку  $1 \cdot 10^5$ .

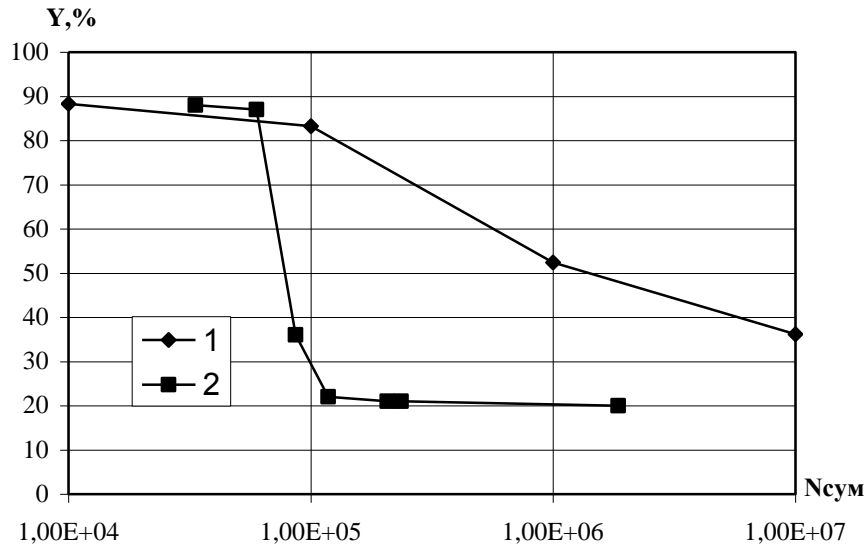


Рисунок 4. Результати мінімізації (Y) у залежності від кількості обчислень цільової функції.

1 – класичний метод випадкового пошуку  
2 – комбінований метод.

Запропонований комбінований метод має три основних параметри, що істотно впливають на процес мінімізації:  $K_{\Pi}$  - кількість підтверджень мінімального значення цільової функції (див. рис. 3 блок 2 і блок 9), початкове і найменше значення кроку зміни перемінних (див. рис.3, блок 4, процедура Хука-Дживса). Як видно з рис. 5 і 6 збільшення  $K_{\Pi}$  і величини початкового кроку і зниження величини мінімального кроку приводить до підвищення точності визначення параметрів моделі, що, природно, викликає збільшення витрат ресурсів ЕОМ.

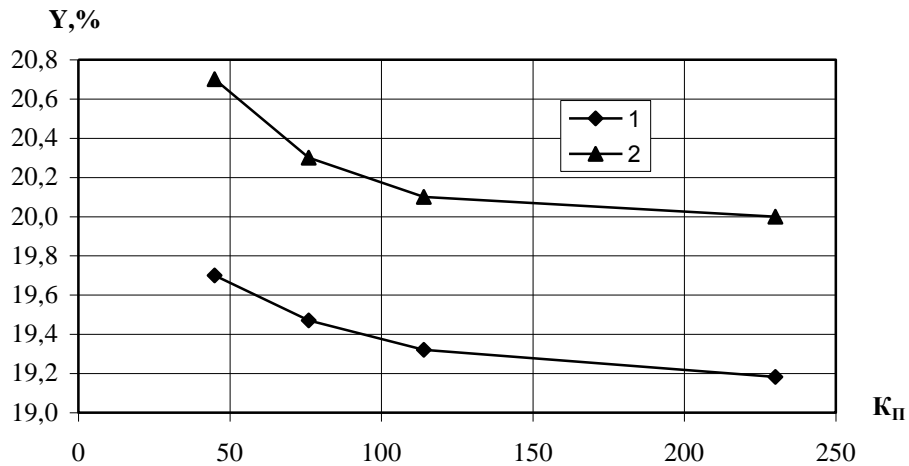


Рисунок 5. Зміна результатів мінімізації (середнього значення) у залежності від величини початкового кроку і кількості підтверджень мінімального значення цільової функції.

1 – початковий крок зміни: питомих опорів – 40 Ом·м, глибини першого шару – 4 м. 2 – початковий крок зміни: питомих опорів – 10 Ом·м, глибини першого шару – 1 м.

Оптимальність процесу обчислень (співвідношення між витратами ресурсів ЕОМ і точністю визначення параметрів моделі) визначається додатковими факторами, що виходять за рамки даного аналізу і вимагає додаткових досліджень.

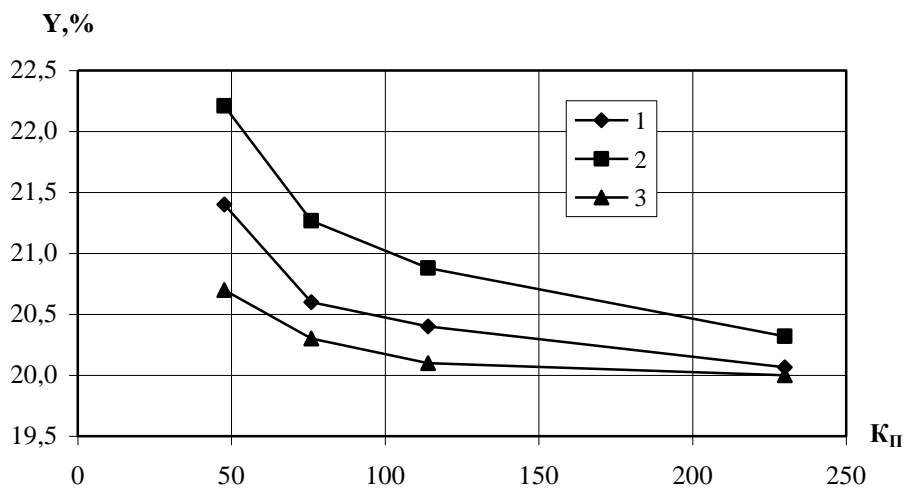


Рисунок 6. Зміна результатів мінімізації (середнього значення) у залежності від величини мінімального кроку і кількості підтверджень мінімального значення цільової функції.

1 – мінімальний крок зміни: питомих опорів – 0,05 Ом·м, глибини першого шару – 0,005 м. 2 – мінімальний крок зміни: питомих опорів – 0,08 Ом·м, глибини першого шару – 0,008 м. 3 – мінімальний крок зміни: питомих опорів – 0,03 Ом·м, глибини першого шару – 0,003 м.



У результаті рішення задачі, яка описується виразами (4) і (5) маємо набір  $(\rho_1, \rho_2, h)$  при яких максимальне відхилення розрахункових і експериментальних даних приймає мінімальне значення з імовірністю  $1-P_0$ . У залежності від величини  $1-P_0$  можуть бути отримані різні значення  $Y_{\min}$ , що відповідають різним наборам  $(\rho_1, \rho_2, h)$ . Розраховані з використанням цих наборів опір ЗП і напруга дотику також мають відхилення від реальних значень, виміряних на підстанції.

$$\Delta = |RZ - IZ| / IZ, \quad (11)$$

де  $RZ$  – розрахункові значення опору ЗП (напруга дотику);

$IZ$  – виміряні значення опору ЗП (напруга дотику).

На рис. 7 наведена характерна зміна величин відхилення розрахункових значень опору ЗП і напруги дотику від виміряних значень, як функції  $Y_{\min}$  для підстанції "Красноград" АК "Харківобленерго". Величини виміряних значень склали: опір ЗП – 0,22 Ом, напруга дотику в обраній точці порівняння – 207 мВ. Як видно з наведених графіків, найбільший вплив величина  $Y_{\min}$  має на опір ЗП.

Були проведені порівняльні розрахунки по приведенню даних ВЕЗ до двошарової моделі за допомогою розробленої програми і програми IPI [6]. Встановлено, що запропонована нами програма має кращі показники з точності апроксимації даних ВЕЗ; розрахункові значення, отримані за допомогою розробленої програми, забезпечують більш близький збіг розрахункових і експериментальних значень опору ЗП підстанції і напруги дотику.

За допомогою описаної програми проведений вибір параметрів двошарової моделі ґрунту більш ніж для 70 підстанцій. Результати розрахунку опору ЗП і напруги дотику показали задовільний збіг з результатами вимірів.

### Висновки

1. У роботі розглянуто задачу визначення параметрів двошарової моделі ґрунту, для вирішення якої запропоновано комбінований метод глобальної мінімізації, що забезпечує обчислення з наперед заданими показниками надійності і довірчої імовірності результату.

2. Показано вплив різних параметрів обчислювального процесу на точність результату, і точності визначення параметрів двошарової моделі ґрунту на точність розрахунку опору ЗП підстанції і напруги дотику.

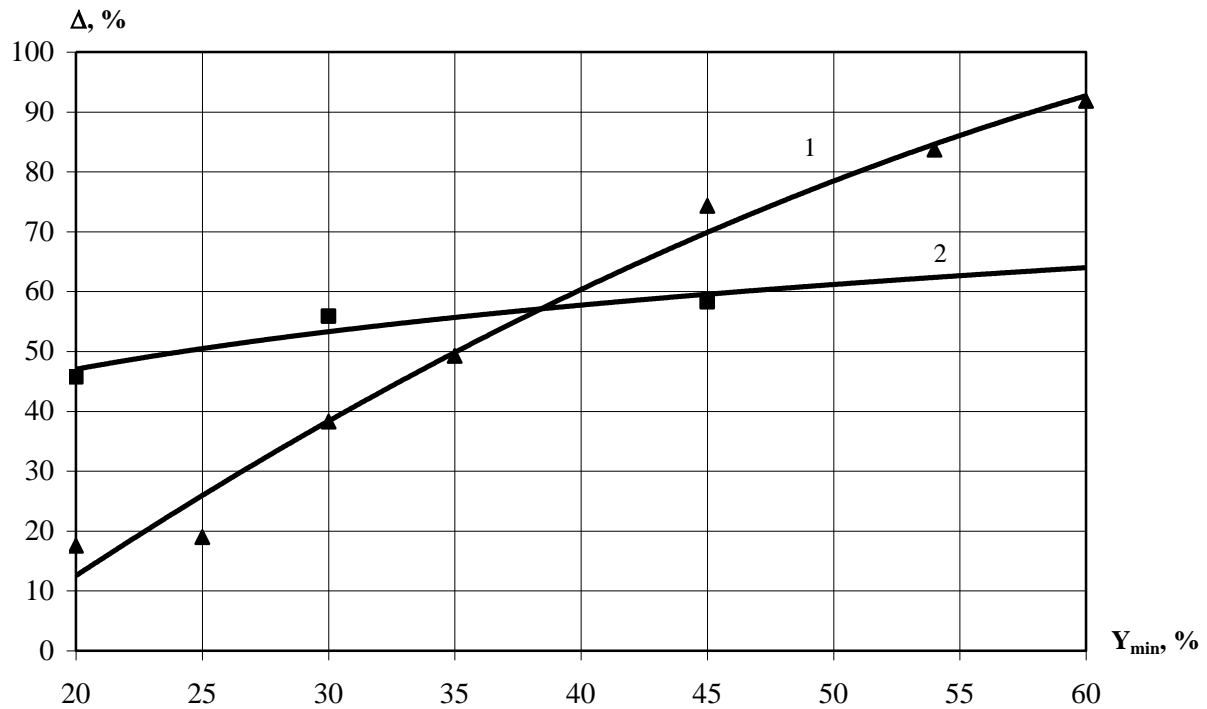


Рисунок 7. Відхилення розрахункових і експериментальних значень опору ЗП – 1 і напруги дотику – 2 для підстанції "Красноград" АК "Харківобленерго".

3. Використання розробленої програми як модулю програми розрахунку ЗП підстанцій забезпечує задовільний збіг розрахункових і експериментальних значень опору ЗП і напруги дотику.

4. Матеріали статті будуть використані для подальших робіт з автоматизації процесу визначення параметрів ґрунту з перспективою створення мікропроцесорного пристрою, що входить до складу діагностичного комплексу.

5. Подальші роботи в даному напрямку передбачають дослідження в області оптимізації співвідношення між витратами ресурсів ЕОМ і точністю визначення параметрів моделі ґрунту.

### Література

1. ГНД 34.20.303-2003. Випробування та контроль стану заземлювальних пристроїв електроустановок. Типова інструкція. Київ: ОЕП "ГРІФРЕ". 2004. – 47 с.
2. Прогнозирование аварийного состояния заземляющих проводников на подстанции / А.А. Петков, Д.Г. Колиушко, Г.М. Колиушко // Энергетика и электрификация, 2002. - №1. – С. 36 -41.
3. Коструба С.И. Измерения электрических параметров земли и заземляющих устройств. М.: Энергия. 1972. – 168 с.
4. Хмелевской В.К., Бондаренко Б.М. Электроразведка: Справочник геофизика. Кн. 1. М.: Недра. 1989. – 378 с.
5. Хмелевской В.К., Шевнин В.А. Электрическое зондирование геологической среды. Ч2 М.: Изд-во МГУ.1992. – 200 с.
6. Карякин Р.Н. Заземляющие устройства электроустановок. Справочник. М.: ЗАО "Энергосервис". 2002. – 376 с.
7. Колиушко Д.Г. Совершенствование диагностики заземляющих устройств электро-энергообъектов: Дисс ... канд. Техн. наук: 05.11.13. –Х., 2003. - 172 с.
8. Петков А.А, Колиушко Д.Г. Особенности применения индукционного метода при определении глубины залегания заземлителей открытых распределительных устройств // Вестник Харьковского государственного политехнического университета. – 2000, - №82. – С. 75 – 77.
9. Реклейтис Г., Рейвиндран А., Рэгсдел К. Оптимизация в технике. – Кн. 1. М.: Мир. 1986. – 349 с.
10. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. М.: ГИФМЛ. 1962. – 564 с.